



TITLE:

Near-fault Ground Motions for Seismic Design of Bridge Structures(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Wu, Shuanglan

CITATION:

Wu, Shuanglan. Near-fault Ground Motions for Seismic Design of Bridge Structures. 京都大学, 2018, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21084>

RIGHT:

許諾条件により本文は2019-03-26に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	呉 双蘭
論文題目	Near-fault Ground Motions for Seismic Design of Bridge Structures （橋梁の耐震設計のための断層近傍の地震動に関する研究）		
<p>1994 年に発生したノースリッジ地震（Mw 6.7）、また、1995 年の神戸地震（Mw 6.9）及び 1999 年の集集地震（Mw 7.6-7.7）、2016 年熊本地震（Mw 7.0）等多くの大規模内陸地震は、都市インフラ施設、特に断層に近い地域に甚大な損害をもたらした。断層近傍の地震動は遠距離から伝達された地震動と異なり、地表面の変位が大きくなることや断層亀裂が（永久変位）生じることで、その地域付近の構造物に甚大な損傷ないしは崩壊を引き起こすことがある。例えば、2008 年の四川大地震（Mw 7.2）において、SFB 観測点（震源距離 14 km）では、鉛直方向に 376 cm 程度の最大変位（PGD）を記録しており、最大水平変位は 620 cm に達した。また、1999 年に台湾で発生した地震（Mw 7.6）においては、TCU052 地震観測点（震源距離 1.7 km）で、断層方向、断層直交方向、および鉛直方向に、それぞれ 502 cm、722 cm および 409 cm の変位を記録した。</p> <p>一方、従来の橋梁耐震設計では、地震の加速度に起因する構造物の慣性力（主に横揺れ）のみ考慮される場合が多く、地盤の変位を同時に考慮した耐震設計に関する研究事例はわずかである。</p> <p>橋梁架橋地点の直下に断層が存在する場合、その断層が動くことで橋脚基礎を含む地盤に変位が生じることから、この場合の橋梁の耐震設計では、地盤加速度と橋梁支点間の相対変位とその空間変動に起因する内力を同時に考慮する必要がある。また、潜在的な活断層の近くに位置する構造物の動的時刻歴解析を行う場合、永久変位を含む入力時刻歴波形も必要となる。</p> <p>以上のことから、本研究では、断層変位を考慮した新たな地震動作成方法を提案し、橋梁の耐震設計に適用した。本論文は 6 つの章で構成されており、震源断層破壊—地盤応答—構造物応答という一連の物理現象を理論的に一貫して捉えて、構造物の地震時挙動を解明することを目的としている。</p> <p>以下に各章の概要を述べる。</p> <p>第 1 章では、本研究の概要と本研究の目的について述べている。本章では、震源近傍の地震動に関するシミュレーションとその評価、および橋梁の地震時動的応答に関する過去の研究を整理した。</p> <p>第 2 章では、断層近傍の地震動の特徴を詳述している。</p> <p>ここでは主に震源メカニズム、永久変位（フリングステップ）、地震波の指向性、パルス速度波効果、上盤効果、さらに特徴的なこれまでの主要な地震動について説明するとともに、橋梁に及ぼす断層近傍の地震動の時空間的特徴について詳細に記述した。併せて、2016 年 4 月 14 と 16 日の熊本地震発生後に現地で実施した調査結果を整理した。具体的には、断層近傍の地震動による構造物被害について述べ、その特徴を明らかにするための例として、南阿蘇村の黒川地区の 138 件の住宅を対象として、異なる材質（RC（12）、木造（124））、鋼構造（1）、不明（1））を詳細に調査した。ここでは、大振幅、衝動的な揺れ、および地盤の永久変位の下で、76 軒の住宅が崩壊している。また、車両の転倒と建物の傾斜および倒壊方向は、ほぼ破壊が進行する断層に直交する方向であり、S 波の放射特性に基づくフォワードディレクティビティの影響を受けたものと思われる。建物は、崩壊、大きな傾斜、柱のせん断破壊、断層を横切る際の大きな相対変位による損傷等を示し、断層近傍の地震動の複雑な特性を示すことがわかった。</p> <p>第 3 章では、断層近傍の地震動のハイブリッド合成法を紹介した。ハイブリッド合成法は、修正された統計的グリーン関数と理論的グリーン関数方法の組み合わせである。</p> <p>特に、統計的なグリーン関数に関しては、断層近傍の地震動の近地項を含む完全な波形を再現するように修正した。相互作用成分および中間項と近地項を遠地項の 2 つの比を導入するとともに、遠方場の P 波も S 波と同様の計算法を導入した。具体的な 2 つの比とは、一つ目は極座標における $\theta\phi$ 方向に沿った成分に関連する FS（S 波遠地項）比（R_S）であり、2 つ目は \mathbf{r} 方向に沿った成分に関連する FP（P 波遠地項）比（R_P）である。これらの 2 つの比率（R_S と R_P）は、$R\omega/V_S$ の比率に関連するものである。この手順によって、断層近傍の地震動の完全な波形を得ることができた。FS と FP の影響に関する簡単な例として、逆断層モデルを対象に検討を実施した。$\alpha/\beta = 3.0/2.5$ の仮定に基づいて、</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	呉 双蘭
<p>10 より小さい場合に R_P が R_S よりも大きいことを示すとともに、R_P と R_S は震源によらないことを示して理論との整合性を確認した。</p> <p>このハイブリッド合成法の適用性を検証するために、横ずれ断層と逆断層に対する解析を行った。横ずれ断層モデルでは、断層直交方向に配置された観測点に対して、断層近傍では静的変位が、断層線からの距離が遠くなるにつれて動的項に起因する変位が支配的となった。逆断層モデルでは上盤において明瞭かつ支配的な揺れが見られることを確認した。</p> <p>開発したのハイブリッド合成法に基づいて、1999 年の集集地震のシミュレーションを実施した。観測された変位時刻歴と模擬された変位時刻歴との比較から、観察された記録と比較して UD 方向の変位成分のシミュレーション結果に幾分差が見られた観測点も散見されたが、総じて観測された変位と良好な一致を示し、提案されたハイブリッド法が、断層近傍の強い地震動を良好に表現できていることを提示した。</p> <p>第 4 章では、断層近傍の地震動の空間分布と断層の深さおよび地盤条件の違いが地震動に与える影響について評価した。断層付近（震源から 20km 以内）の 2,500 箇所の観測地点を仮定し、逆断層モデルにより各点での地震動を計算した。加速度場の 3 次元ベクトルは、断層近傍の加速度がかなり複雑であることを示した。しかし、速度の 3 次元ベクトル場は 0.5 秒～3.0 秒の幅を持つパルス形状を示し、断層の中央領域からの破壊伝播の様子が容易に見てとれた。変位の 3 次元ベクトル場の場合、上盤効果が 0.1 秒あたりから現れた。0.1s～3.0s の間では変位ベクトルが大きく変化し、5.0s 以降は永久変位となって現れた。このようなシミュレーション波形からも、断層近傍の地盤震動は、複雑な双極震源、波の伝播特性、および指向性等のために、様々な特徴が複合的に干渉する現象であることが示された。断層の深さの影響は、本ケースの場合は深さが 700m を超えると、永久変位が明瞭でなくなる（3.0cm 未満）ことがわかった。地盤条件も結果に大きな影響を与えた。</p> <p>第 5 章では、断層の永久変位を考慮した橋梁の設計法について考察し、断層を横切る橋梁の地震応答解析のための多点異入力解析を実施した。まず、5 径間の橋の線形解析を行い、変位時刻歴（静的項を含むものと含まないもの：多点異入力）と道路橋示方書同解説 V 耐震設計編（道示）の加速度時刻歴（レベル 2 の II-III-2：多点同時入力）の 3 種類の波形を入力して検証を行った。断層を跨ぐ橋梁モデルは、特に静的項を含む入力の場合に大きな残留応答値（上部構造の残留変形、橋脚の相対変位と支承の残留変形）を示し、橋の設計時には断層変位を注意深く考慮する必要があることがわかった。</p> <p>次に、断層近傍の橋梁の非線形挙動の必要性を確認するため、支承を考慮した 5 径間橋梁の解析を OpenSees を用いて行った。橋を横切る断層破壊にディップ、ストライク、滑り方向角の影響を導入した検討を行った結果、ディップ角は、地表面波形の垂直成分と橋梁の地震応答に大きな影響を与え、ディップ角が 15° より小さい場合には、垂直成分が水平成分よりもわずかに小さいか等しくなること、ディップ角が 45° より大きい場合には鉛直成分が水平成分よりも大きくなることなどが明らかになった。したがって、垂直応答はディップ角と相関があるため、設計に関しては特別な注意が必要であることが分かった。また、橋脚の塑性ヒンジの曲率と変形に関しては、軸力の変動を考慮しないプッシュオーバー解析から得られる降伏強度、耐震性能 2 および 3、そして限界状態から判断すると、橋の非線形解析応答値は安全側の結果を得た。しかし、橋脚の最大ひずみによる評価では、耐震性能 2 および 3 を満足しない結果や限界状態を超える結果も得られた。したがって、動的解析から判断すると、軸力の変動を考慮していないプッシュオーバー解析は橋の耐震性能を過大評価している可能性があることがわかった。</p> <p>第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。</p>			

2016年熊本地震(Mw7.0)等の近年の多くの大規模内陸地震は、特に断層に近い都市インフラ施設に甚大な損害をもたらした。活断層の近くの構造物に対して動的時刻歴解析を行ない、その安全性の照査を行う場合には、断層の永久変位を含む時刻歴波形が必要となる。本研究では、従来の地震動作成方法に対して断層変位を考慮した新たな手法を提案し、橋梁の耐震設計に適用することを試みた。

本研究で行った事、および得られた成果は以下の通りである。

1. 過去の断層近傍の地震動を詳細に検討し、その特徴について整理した。さらに、社会基盤施設の中でも特に重要度の高い橋梁に着目し、過去の地震動が橋梁に及ぼした影響と、断層近傍の地震動の時空間的特徴についての分析を行った。
2. 2016年熊本地震の際に地表面断層が現れ、かつ甚大な構造物被害が生じた南阿蘇村黒川地区で被害調査を実施した。調査結果から、大振幅および永久変位の下で、断層近傍の地震動が複雑な特性を示し、多大な構造物被害を生ぜしめることがわかった。車両の転倒と建物の傾斜および倒壊方向は、ほぼ破壊が進行する断層に直交する方向であり、フォワードディレクティビティの影響を受けた可能性を提示した。
3. 理論的グリーン関数法と統計的グリーン関数法を統合したハイブリッド法を提案し、これを用いて断層近傍の地震波形を模擬した。このハイブリッド法の適用性を検証するために、1999年に台湾で発生した集集地震のシミュレーションを実施した結果、観測された変位と良好な一致を示し、提案手法によって断層近傍の変位を含む強震動を適切に表現できることがわかった。
4. 断層深さおよび地盤条件の違いが地震動の空間分布に与える影響について評価した。断層近傍(本研究では震源から20km以内)に2,500箇所の観測地点を仮定し、逆断層モデルにより各点での地震動を計算した。その結果、断層近傍の地震動は波動の伝播特性や指向性等によって、複合的に干渉する様々な震動現象を示すことができた。また断層深さが700mを超えると、永久変位が明瞭でなくなる(3.0cm未満)ことがわかった。
5. 断層の永久変位を考慮した橋梁の設計法について検討するため、断層を横切る橋梁の地震応答解析のための多点異入力非線形解析を、断層のdip、strike、rake方向角を様々に変化させて実施した。その結果、特にdip角が地表面波形の垂直成分と橋梁の地震応答に大きな影響を与えることが明らかとなった。橋脚の塑性ヒンジの曲率と変形に関しては、軸力の変動を考慮しないプッシュオーバー解析から得られる降伏強度、耐震性能2および3、そして限界状態から判断すると、橋の非線形解析応答値は安全側の結果を得た。しかし、橋脚の最大ひずみによる評価では、耐震性能2および3を満足しない結果や限界状態を超える結果も得られた。したがって、動的解析から判断すると、軸力の変動を考慮していないプッシュオーバー解析は橋の耐震性能を過大評価している可能性があることがわかった。

以上より、本論文は従来の地震動作成方法を改良した、断層変位を考慮できる橋梁の設計用入力地震動作成のための新たな手法とその橋梁への適用に関して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成30年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成31年3月25日までの間)、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。